

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

**2016**

**Lukáš Neslaník**

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Vodní elektrárny**  
**Hydroelectric Power Stations**

**2016**

**Lukáš Neslaník**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Neslaník**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Vodní elektrárny**  
**Hydroelectric Power Stations**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky vodní energie
2. Výroba elektrické energie z vody
3. Problematika provozování vodních elektráren

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Broža V.: Využití vodní energie, ČVUT Praha, 1993
2. Další literatura podle pokynů vedoucího bakalářské práce


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 29.4. 2016

.....  
.....

Podpis

# **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá problematikou vodních elektráren. Na začátku je vysvětlena vodní energie, její rozdělení a základy využití vodní energie. Je zde schéma vodní elektrárny se stručným popisem. V další části je rozdělení vodních elektráren a její klasifikace. Nejdůležitější části jsou vodní motory, jejich rozdělení a využití. Poté následují synchronní alternátory, asynchronní generátory a transformátory s popisem a principem činnosti. Předposlední části je popsán provoz malých vodních elektráren. Na závěr jsou zde popsány podmínky pro připojení.

# **Abstract**

The bachelor work is applying to issue of hydro - power. The hydro-power, their distribution and basic utilization are explained at the beginning. There is the electric power scheme with a brief description. Next, there is division of hydro-power plants and their classification. The most important parts are the water engines and, their distributions and use.

Next, the synchronous alternators, the asynchronous generators and the transformers with a description and principle of operation. The penultimate section describes the operation of small hydro-power plants. At the end, there are described conditions to a connection.

# **Klíčové slova**

Vodní energie, vodní kola, vodní turbíny, vodní regulátory a generátory.

# **Key words**

Hydropower, water wheel, water turbines, water regulators and generators.

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce **doc. Ing. Petrovi Krejčímu, Ph.D.** za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 VODNÍ ENERGIE .....</b>	<b>11</b>
1.1 Zdroje vodní energie .....	11
1.1.1 Chemická forma energie vody.....	11
1.1.2 Tepelná energie vody.....	11
1.1.3 Mechanická energie vody .....	11
1.2 Energetické hospodářství .....	12
<b>2 ZÁKLADY VYUŽITÍ VODNÍ ENERGIE .....</b>	<b>12</b>
2.1 Potenciální energie vody v nádrži.....	12
2.2 Základní způsoby využití vodní energie .....	14
2.3 Základní parametry hydroenergetického díla .....	14
2.3.1 Průtok turbínou .....	14
2.3.2 Spád .....	15
2.3.3 Účinnost a výkon .....	15
<b>3 DRUHY VODNÍCH ELEKTRÁREN A JEJICH KLASIFIKACE.....</b>	<b>16</b>
3.1 Podle velikosti instalovaného výkonu: .....	16
3.2 Malé vodní elektrárny se dělí: .....	16
3.3 Podle velikosti spádu se vodní elektrárny dělí na:.....	16
3.4 Podle charakteru pracovního režimu rozeznáváme: .....	17
3.5 Podle účasti na pokrývání diagramu zatížení elektrizační soustavy se vodní elektrárny dělí na: .....	17
3.6 Podle řízení provozu rozeznáváme vodní elektrárny:.....	17
<b>4 SCHÉMA VODNÍ ELEKTRÁRNY A JEJÍ POPIS .....</b>	<b>17</b>
<b>5 VODNÍ MOTORY .....</b>	<b>18</b>
5.1 Vodní kola.....	18
5.1.1 Ponceletovo vodní kolo .....	19
5.1.2 Sagbienovo vodní kolo [Sažbienovo].....	20
5.1.3 Výhody a nevýhody vodních kol.....	20
5.2 Vodní turbíny a jejich rozdělení .....	20

5.2.1	Základní pojmy.....	20
5.2.2	Podle způsobu přenosu energie vody na oběžné kolo rozeznáváme:.....	21
5.2.3	Podle směru proudění oběžným kolem vzhledem k hřídeli rozeznáváme: .....	21
5.2.4	Peltonova turbína.....	21
5.2.5	Bánkiho turbína .....	22
5.2.6	Francisova turbína .....	23
5.2.7	Kaplanova turbína.....	23
5.2.8	Vrtulová turbína.....	24
5.2.9	Diagonální (Deriazova) turbína .....	24
5.2.10	Přímoproudová turbína .....	25
5.2.11	Reversibilní turbína .....	26
5.3	Kavitace turbín.....	26
5.4	Regulátory vodních turbín .....	27
5.5	Převody .....	28
<b>6</b>	<b>ELEKTROTECHNICKÁ ČÁST VODNÍCH ELEKTRÁREN.....</b>	<b>28</b>
6.1	Hydroalternátory .....	29
6.2	Asynchronní generátor.....	32
6.3	Transformátory .....	33
6.4	Provozní výhody vodních elektráren .....	34
<b>7</b>	<b>PROVOZ MALÝCH VODNÍCH ELEKTRÁREN .....</b>	<b>34</b>
7.1	Řízení malých vodních elektráren .....	34
7.2	Manipulační a provozní řady .....	35
7.3	Provoz ve zvláštních podmínkách .....	35
7.3.1	Provoz při nízkých průtocích.....	35
7.3.2	Provoz při povodních .....	36
7.3.3	Zimní provoz .....	36
<b>8</b>	<b>PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ .....</b>	<b>37</b>
8.1	Zvýšení napětí.....	37
8.2	Změny napětí při spínání .....	38
8.3	Připojování synchronních generátorů .....	39
8.4	Připojování asynchronního generátoru .....	39
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>40</b>



<b>SEZNAM ZDROJŮ.....</b>	<b>41</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>41</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>42</b>

## ÚVOD

Voda a energie jsou dvě důležité složky života lidí. Vodní energie je důležitým cenným přírodním bohatstvím každé země. V dřívějších dobách se hlavně využívala pro pohon pil a vodních mlýnů. V dnešní době se hlavně využívá pro výrobu elektrické energie ve vodních elektrárnách.

Využití této energie na výrobu elektrické energie ve vodních elektrárnách je v každé zemi a kontinentu jiné. Je to dáno přírodními podmínkami a také hospodářským, technickým a společenským rozvojem dané země.

Česká republika, má omezené zdroje vody, a proto je nutné s touto energií rozumně nakládat.

Nejpodstatnější výhodou vodní energie je, že je ekologická, a také je to nevyčerpatelný zdroj energie. Jiné zdroje energie, jako fosilní paliva např. černé uhlí a ropa, které jsou vyčerpatelné zdroje, kdy jejich zásoby se každý dnem snižují, budou se muset něčím nahradit. Vodní elektrárny určitě nemůžou zcela nahradit elektrárny na fosilní paliva. Je to dáno tím, že vodní elektrárny nedosahují takových výkonů, jako např. tepelné elektrárny a lidstvo neustále zvyšuje spotřebu elektrické energie.

Cílem této bakalářské práce je popsat přeměnu vodní energie na elektrickou ve vodních elektrárnách.

Dalším cílem je popis vodních motorů a také popis některých částí vodní elektrárny.

Dále se tato práce zabývá problematikou provozování malých vodních elektráren a nakonec jsou zde zmíněny podmínky pro připojení vodní elektrárny.

# 1 VODNÍ ENERGIE

## 1.1 Zdroje vodní energie

Voda v přírodě je nositelem energie chemické, tepelné a zejména mechanické. Atraktivita těchto tří druhů energie vody pro přeměnu na energii elektrickou je však velmi rozdílná [1].

### 1.1.1 Chemická forma energie vody

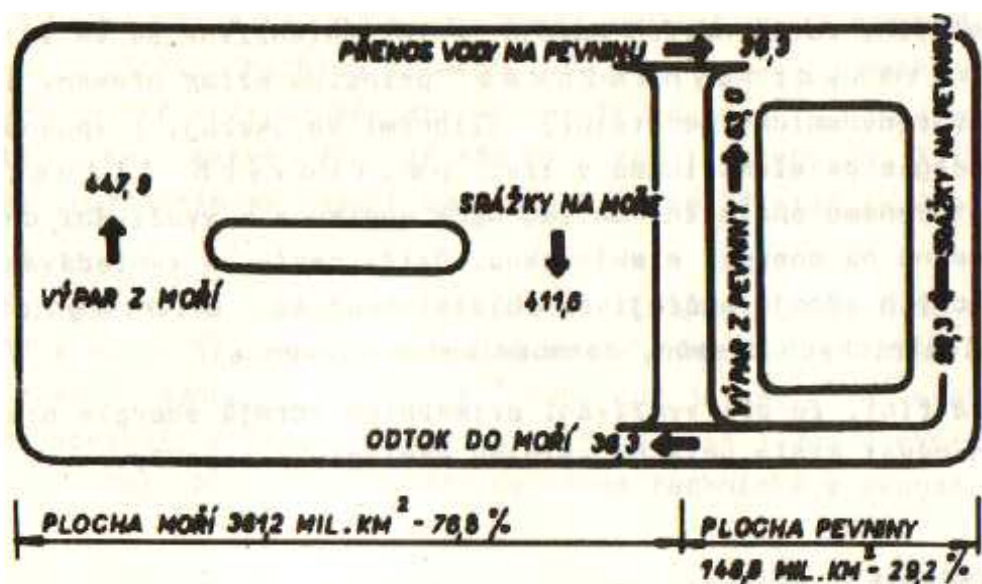
V přírodě se projevuje především vznikem solných roztoků, které jsou jejím hlavním činitelem. Voda rozpouští každoročně asi  $27 \cdot 10^6$  tun tuhých látek, což představuje obrovské množství tohoto druhu přírodní energie. Jejím praktickému využití však brání malá koncentrace roztoků [1].

### 1.1.2 Tepelná energie vody

V přírodě je technicky použitelná v zařízeních, která jsou založena na principu využití tepelného spádu. Ten se vyskytuje v tropických mořích, v nichž je voda na povrchu teplá  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a v hloubce asi  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1].

### 1.1.3 Mechanická energie vody

Je dána koloběhem vody na zeměkouli a jejím celkovým objemem. Bilance koloběhu vody na Zemi je znázorněna na obr. č. 1. Protože zdrojem tohoto koloběhu je sluneční energie, patří energie vod k stále se obnovujícím, v podstatě nevyčerpatelným energetickým zdrojům [1].



Obr. č. 1 Bilance koloběhu vody na Zemi (v 1000 km<sup>3</sup>) [1]

## 1.2 Energetické hospodářství

Energie je zřejmě jedním z limitujících faktorů rozvoje lidské společnosti. V hospodářském životě je zapotřebí energie zušlechtěné, která se získává přeměnou z energie surové. Přitom v současném stadiu vývoje se používá energie mechanické, chemické, tepelné a elektrické. Spotřeba energie v celém světě velmi rychle roste a zabezpečení její dodávky v dostatečném množství je jedním z nejdůležitějších předpokladů zvyšování životní úrovně lidí. Problematika využívání energetických zdrojů a racionálního hospodaření s energií všeho druhu, která je náplní energetického hospodářství, nabývá na stále větším významu.

V energetickém hospodářství lze rozeznávat čtyři fáze:

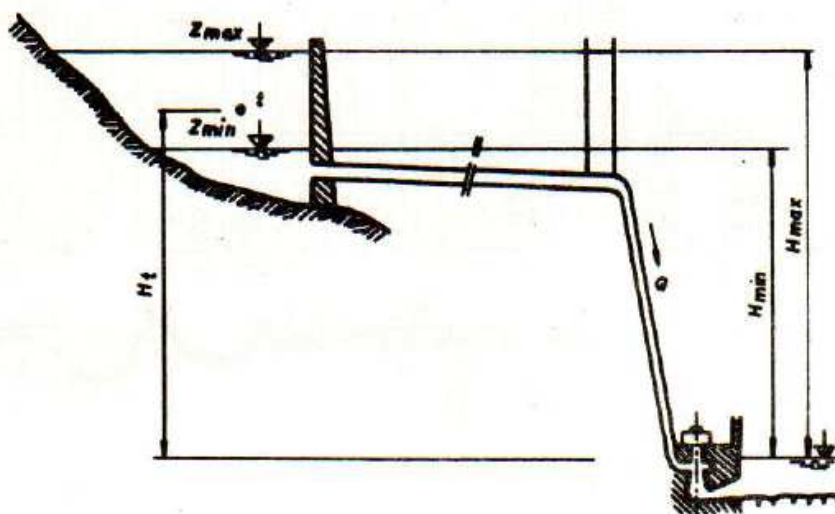
- 1) získání energie v přírodní formě, tj. přímé využití energetického zdroje (odkrytí ložiska, otevření dolu, vybudování vodní elektrárny);
- 2) výroba energie, tj. přeměna přírodní energie ve formu schopnou přenosu (dopravy);
- 3) přenos (doprava) a rozvod (distribuce) energie;
- 4) spotřeba energie.

Ve třetí a čtvrté fázi se zajisté může vyskytnout i fáze druhá, tj. přeměna energie. Ve třetí fázi se však nejedná o změnu formy energie, nýbrž pouze o změnu parametrů (napětí, tlaku apod.). Ve čtvrté fázi se dodaná forma energie může ve spotřebičích měnit i na jinou vhodnou formu [1].

## 2 ZÁKLADY VYUŽITÍ VODNÍ ENERGIE

### 2.1 Potenciální energie vody v nádrži

Objem vody akumulovaný v nádrži představuje potenciální energii, kterou lze přeměnit vhodným zařízením na energii elektrickou. Do jaké míry se to podaří, záleží na účinnosti celého zařízení pozůstávajícího např. z vtoku, tlakového přiváděče, turbíny s generátorem a odpadu (obr. č. 2).



Obr. č. 2 Schéma k výpočtu energetického ekvivalentu nádrže [1]

Uvažujeme nádrž s objemem  $V [m^3]$ , umístěnou v dostatečně vysoké poloze, která je zcela naplněna vodou. Objem vody, který se nachází mezi maximální hladinou  $Z_{\max}$  a minimální hladinou  $Z_{\min}$ , představuje potenciální energii schopnou vykonávat odpovídající práci, např. vyrobit elektrickou energii. Množství této energie je dáno objemem vody  $V$  a spádem  $H$ . Přitom není důležité, za jakou dobu se nádrž vyprázdní.

Vyprázdní-li se nádrž za jednu hodinu, bude průtok

$$Q = \frac{V}{3600} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

Předpokládejme, že při konstantním průtoku  $Q$  se spád  $H$  téměř nemění (rozdíl  $Z_{\max} - Z_{\min}$  je oproti  $H$  hodnota velmi malá a zanedbatelná). Generátor bude mít po celou hodinu na svorkách výkon

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_{\text{netto}} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad [kW] \quad (2)$$

Za tuto hodinu by se vyrobila elektrická energie, která je ekvivalentní potenciální energii vody v nádrži:

$$E = P \cdot 1h \quad [kWh] \quad (3)$$

Potom

$$E = 9,81 \cdot \frac{V}{3600} \cdot H_{\text{netto}} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad [kWh] \quad (4)$$

čili

$$E = \frac{V \cdot H_{\text{netto}}}{367} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad [kWh] \quad (5)$$

Budeme-li přibližně předpokládat  $\eta_t \cdot \eta_g = 0,735$  a  $H_{\text{netto}} = H$ , zjednoduší se tento vzorec na tvar velmi dobře zapamatovatelný:

$$E = \frac{V \cdot H}{500} \quad [kWh] \quad (6)$$

To znamená, že např. při  $1 m^3$  vody potřebujeme na výrobu  $1 kWh$  spád asi  $500 m$ .

Výpočet se zpřesní, zahrnou-li se do něho hydraulické ztráty. Při vyšších spádech, kde se více projeví zmenšení užitého spádu o ztráty třením vody v potrubí, lze použít pozměněného vzorce:

$$E = \frac{V \cdot H_t}{620} \quad [kWh] \quad (7)$$

a naopak, při velmi nízkých spádech a za předpokladu  $\eta_t \cdot \eta_g = 0,80$  lze použít vzorce [1]

$$E = \frac{V \cdot H_t}{450} \quad [kWh] \quad (8)$$

## 2.2 Základní způsoby využití vodní energie

Jestliže chceme efektivně využít vodní energii určitého úseku vodního toku, musíme v lokalitě vodní elektrárny soustředit spád a průtok.

Spád - výškový rozdíl hladin vody v nádrži (zdrži) nad vodní elektrárnou a v odpadě pod ní.

Průtok - množství vody protékající vodním motorem (turbínou) za jednu sekundu; nazývá se též hltnost turbíny.

Voda protékající z horní nádrže do dolní vodním motorem vykonává práci. Je-li spád využívaný vodní elektrárnou  $H$  a průtok vodním motorem  $Q$ , bude teoretický výkon

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad [W] \quad (9)$$

Skutečný výkon i energie vodního zdroje budou menší, protože při přeměně hydraulické energie na mechanickou v turbíně a mechanické energie na elektrickou v generátoru vznikají ztráty. Pro předběžné odhady dosažitelného výkonu se používají přibližné vzorce - u malých vodních elektráren

$$P = (5 \text{ až } 7) \cdot Q \cdot H \quad [kW] \quad (10)$$

a u středních a velkých vodních elektráren [1]

$$P = 8 \cdot Q \cdot H \quad [kW] \quad (11)$$

## 2.3 Základní parametry hydroenergetického díla

Základní veličinami pro výpočet výkonu a výroby elektrické energie z vodního zdroje jsou průtok, spád a účinnost hydroagregátu, tj. vodní turbíny a elektrického generátoru [1].

### 2.3.1 Průtok turbínou

Průtok turbínou je celkové množství vody protékající turbínou za 1 sekundu. Udává se v  $m^3 \cdot s^{-1}$ . Rozumíme tím úhrnné množství vody, potřebné pro provoz turbíny při daném zatížení, včetně ztrát. Často se používá i pojem hltnost turbíny. Hltnost turbíny při určitém spádu je maximální průtok turbínou při tomto spádu.

Jmenovitá hltnost je maximální průtok turbínou při jmenovitém spádu (tj. při spádu, při němž je nejvyšší účinnost).

Hltnost při maximálním spádu je největší zaručený průtok při maximálním spádu.

Největší průtok, který projde všemi vodními motory hydroenergetického díla, je jeho průtoková kapacita. Určení průtokové kapacity je úloha technicky a ekonomicky velmi závažná a obtížná [1].

### 2.3.2 Spád

V hydroenergetické praxi rozlišujeme v podstatě dva druhy spádů - hrubý celkový spád  $H_b$  a užitný, čistý spád  $H$ .

**Hrubý spád  $H_b$**  je celkový statický spád mezi dvěma uvažovanými profily úseku řeky, který chceme energeticky využít. Je dán rozdílem hladiny v těchto profilech při nulovém průtoku vodní elektrárny, takže jej lze na hotovém díle jednoduše určit nivelizací.

**Užitný spád  $H$  (netto)** je výškový rozdíl mezi čarami energie těsně před vodním motorem a za ním. Je to hrubý spád, od něhož jsou odečteny hydraulické ztráty v přiváděči a odpadu, které se nezahrnují do účinnosti turbíny.

Pro turbíny se udávají tyto užité spády:

$H_n$  - navrhovaný spád, tj. nejčastěji se vyskytující užitný spád;

$H_{\max}$  - maximální spád, tj. největší užitný spád, na který je turbína konstruována;

$H_j$  - jmenovitý spád, tj. užitný spád, při němž má turbína nejlepší hydraulické vlastnosti [1].

### 2.3.3 Účinnost a výkon

Účinnost turbíny (vodního motoru)  $\eta_t$  lze definovat jako poměr skutečného výkonu turbíny  $P$  (měřeného na hřídeli) k teoretickému výkonu  $P_o$ :

$$\eta_t = \frac{P}{P_o} \quad (12)$$

V této celkové účinnosti turbíny musí být zahrnuty všechny hydraulické ztráty ( $\eta_h$ ) a objemové ztráty ( $\eta_v$ ), k nimž dochází při protékání vody jednotlivými částmi turbíny, i všechny mechanické ztráty ( $\eta_m$ ) vznikající třením v ložiskách a ucpávkách celého soustrojí. Celková účinnost turbíny je tedy:

$$\eta_t = \eta_h + \eta_v + \eta_m \quad (13)$$

Její hodnota se u dobře navržených turbín a optimálních hodnot průtoku a spádu pohybuje v rozmezích  $\eta_t = 0,80$  až  $0,94$ . Přitom čím větší je výkon turbín, tím vyšší účinnosti zpravidla dosahuje.

Mechanický výkon odevzdává turbína generátoru, v němž se tento mění na elektrický. Výkon generátoru se měří zpravidla na svorkách. Generátor má vlivem vlastních ztrát účinnost

$\eta_g = 0,85$  až  $0,97$ . V případě, že generátor není na společné hřídeli s turbínou, přistupují ještě ztráty převodem  $\eta_p$ ; obvykle je však hřídel společná a  $\eta_p = 1$ . Výkon, který vodní elektrárna dodává do sítě, je ještě ovlivněn transformací na vyšší napětí. Účinnost transformátoru  $\eta_{tr} = 0,92$  až  $0,98$ .

Celková účinnost hydroagregátu (vodní turbíny a generátoru) s transformátorem je potom dána vztahem:

$$\eta_c = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \eta_{tr} = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \eta_{tr} \quad (14)$$

Výkon na prahu vodní elektrárny je

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \quad [\text{kW}] \quad (15)$$

přičemž součet výkonů jednotlivých hydroagregátů dává celkový výkon vodní elektrárny.

Výroba vodní elektrárny při výkonu  $P$  trvající  $t$  hodin bude [1]:

$$A = P \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (16)$$

### 3 DRUHY VODNÍCH ELEKTRÁREN A JEJICH KLASIFIKACE

Vodní elektrárny se dají klasifikovat podle různých hledisek [3].

#### 3.1 Podle velikosti instalovaného výkonu:

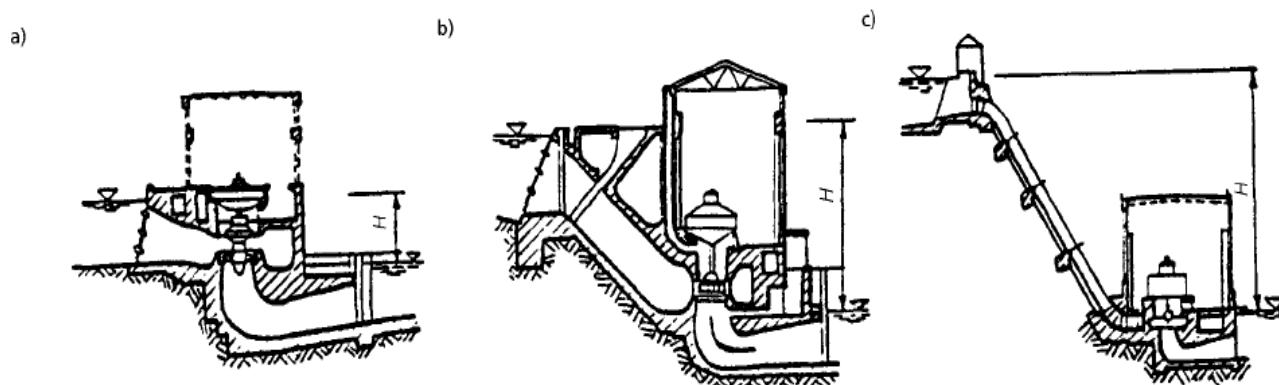
- malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW,
- střední vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW,
- velké vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 200 MW [3].

#### 3.2 Malé vodní elektrárny se dělí:

- domácí vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 35 kW,
- vodní mikroeletřárny s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW,
- vodní minielektrárny s instalovaným výkonem od 100 kW do 1000 kW,
- průmyslové vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW [3].

#### 3.3 Podle velikosti spádu se vodní elektrárny dělí na:

- nízkotlaké využívající spád do 20 m,
- středotlaké využívající spád od 20 m do 100 m,
- vysokotlaké využívající spád nad 100 m [3].



Obr. č. 3 Dělení vodních elektráren podle využívaného spádu (a - nízkotlaká, b - středotlaká, c - vysokotlaká) [3]





- a) Přívodní kanál - přivádí vodu z vodního toku k budově elektrárny.
- b) Česle - slouží na zachycení mechanických nečistot a zabraňují jejich vniknutí do turbíny.
- c) Vtoková hradidla - resp. rychlouzávěry se nacházejí před turbínou a slouží k uzavření vtoku v případě oprav nebo havárie turbíny.
- d) Tlakový přivaděč - slouží na přivádění vody z nádrže k lopatkám turbíny. Podle hltnosti turbíny musí být dimenzovány na odpovídající průtok a jeho průměr může dosáhnout značných rozměrů.
- e) Lopatky rozvádějícího kola - slouží k regulaci průtoku vody turbínou a směřují její tok na lopatky oběžného kola.
- f) Vodní turbína - je zařízení přeměňující potenciální energii vodního sloupce na kinetickou energii točícího se rotoru. Točivý moment je přenášen pomocí hřídele na elektrický generátor, ve kterém vzniká elektrický proud.
- g) Sací roura - je úsek od výstupní části turbíny až po odpadní kanál.
- h) Výtoková hradidla - umožňuje zahrazení sací roury ze strany dolní vody a umožní tím přístup k turbíně za účelem revize a oprav.
- ch) Generátor
- i) Transformátor
- j) Montážní jeřáb - slouží k manipulačním účelům v prostorách strojovny
- k) Odpadní kanál - je úsek od sací roury až po vyústěním do původního koryta říčního toku [2].

## 5 VODNÍ MOTORY

### 5.1 Vodní kola

Jsou schopna dosahovat účinnosti 60 až 80 procent, což lze srovnat s účinností moderních turbín pro práci ve stejných podmínkách. Vodní kola umožňují dokonce využít efektivně energii vody i v lokalitách s nejnižšími užitnými spády i pod 0,5 m. A právě pro spády do 1,5 m se jeví vodní kola i v současné době jako téměř nezastupitelný typ vodního zdroje.

Podle charakteru mechanické energie vody, kterou vodní kola přeměňují na energii rotujícího hřídele, rozlišují se dva druhy. Jednak vodní kola lopatková, využívající kinetickou energii a dále vodní kola korečková využívající jako jediný vodní stroj vůbec potenciální energii vody.

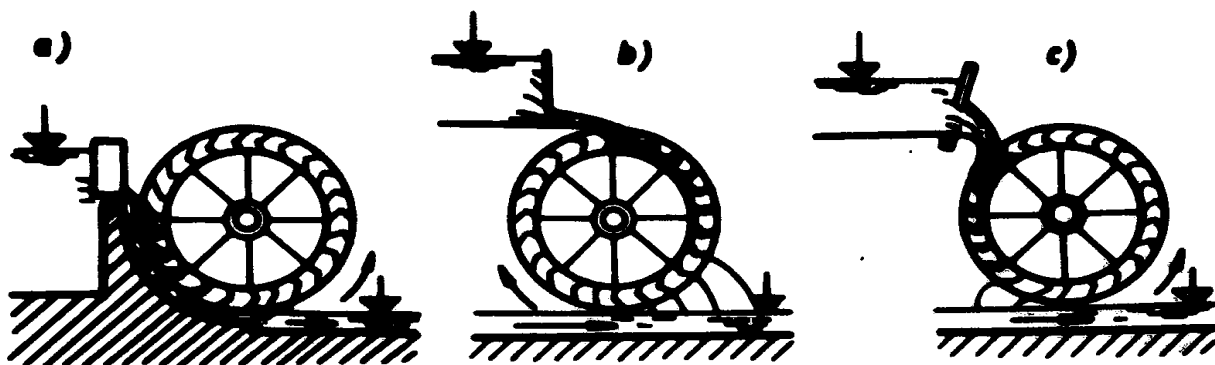
Podle nátoky vody na vodní kolo se rozlišují vodní kola s nátokem:

- vrchní
- střední
- spodní

Pro využívání velmi malých spádů - nedostupných ani moderním turbínám jsou vhodná lopatková vodní kola. Mohou využívat i spády dokonce kolem 0,1 m, ale s účinností jen asi 20 procent. Při větších spádech již nejsou výjimkou účinnosti kolem 70 procent. Rovněž korečková vodní kola vykazují obdobnou účinnost, ale při spádu nad 3 m, což je dnes již právě doménou moderních vodních turbín.

Konstrukce lopatkových vodních kol je tvořena dvojicí bočních věnců, které jsou spojeny lopatkami a hřídelem. Mezi lopatkovou mříží je vodní kolo "průhledné". Voda předává vodnímu kolu energii následující způsobem. Proud vody vstupuje na lopatku ve směru tečny k povrchu lopatky v místě její vstupní hrany a proudí po lopatce až k jejímu konci. Aniž by došlo k přelítu vody dovnitř kola, vrací se proud opačným směrem a opouští lopatku na téže hraně, na které na lopatku vstupoval. Voda nesmí vtékat do vnitřku kola, ale celá energetická přeměna se odehrává výhradně na lopatkách. Hřídel vodního kola nemusí být proto obtékaného kruhového profilu, ale libovolného tvaru, který je

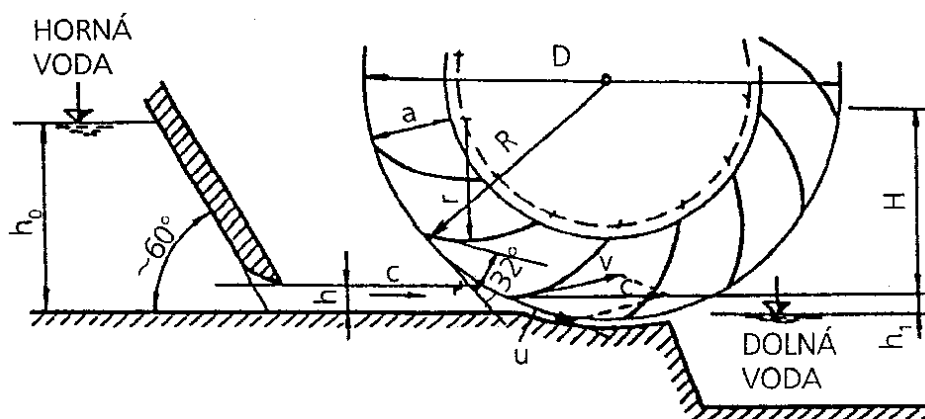
podřízen konstrukčním možnostem. Vhodné tvarování musí mít zejména obtékaný líc lopatky a její vstupní hrana. Používají se zakřivené lopatky ve tvaru válcové plochy. Pro dokonalé využití vodní energie, je velice důležité, aby žádné množství vody neodtékalo nevyužito. Je proto nutné, aby bylo vodní kolo velmi těsně uloženo v pracovním kanálu - mezery pouze 10 až 15 mm [1].



Obr. č. 5 Schéma vodních kol [1]

### 5.1.1 Ponceletovo vodní kolo

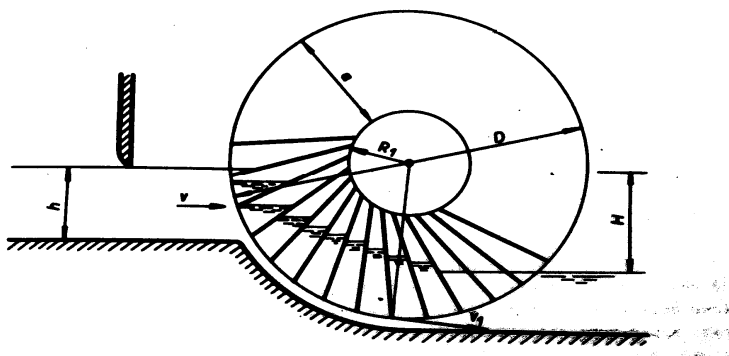
Toto vodní kolo je vhodné pro průtoky  $Q = 0,1$  až  $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  a spády  $H = 0,5$  až  $1,7 \text{ m}$ . Za těchto podmínek je možno dosáhnout účinnost 60 až 70%. Patří do skupiny s dolním nátokem [1].



Obr. č. 6 Ponceletovo vodní kolo [1]

### 5.1.2 Sagebienovo vodní kolo [Sažbienovo]

Toto kolo je vhodné pro průtoky  $Q = 0,6$  až  $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a pro spády v rozmezích  $H = 0,7$  až  $2,5 \text{ m}$ . Účinnost je kolem 80%. Konstrukce tohoto vodního kola umožňuje alespoň částečně využít i potenciální energii vody a jeho uspořádání je na pomezí mezi koly lopatkovými a korečkovými. Lopatky tohoto kola jsou zpravidla rovinné a jsou postaveny mírně šikmo proti proudu vody. Případné zakřivení lopatek v přední části se provádí pro zmenšení odporu při vyjíždění lopatky z dolní vody [1], [4].



Obr. č. 7 Sagebienovo vodní kolo [1]

### 5.1.3 Výhody a nevýhody vodních kol

Oba výše uvedené typy vodních kol (Ponceletovo i Sagebienovo) vykazují kromě společných výhod, jako jsou provozní spolehlivost, dobrá účinnost, výrobní jednoduchost, snadná opravitelnost i některé nevýhody. Jsou to zejména velké nároky na průměr oběžného kola. Výraznou nevýhodou všech vodních kol jsou jejich malé provozní otáčky. Jejich zvětšení není možné, protože by se voda odstředivou silou vylévala z lopatek, aniž by předala svoji energii kolu. Další významnou nevýhodou je provoz v zimním období, kdy námraza omezuje a často i znemožňuje provoz vodního kola [1].

## 5.2 Vodní turbíny a jejich rozdělení

### 5.2.1 Základní pojmy

**Vodní soustrojí** pozůstává z vodního stroje a z hydroalternátoru nebo motorgenerátoru.

**Vodní stroj** přeměňuje mechanickou energii vody na mechanickou energii tuhého tělesa (rotujícího hřídele, pohybujícího se pístu), anebo opačně mechanickou energii tuhého tělesa na mechanickou energii vody.

**Vodní motor** mění mechanickou energii vody na mechanickou energii rotujícího hřídele (motor rotační) nebo pohybujícího se pístu (motor pístový).

**Vodní čerpadlo** přeměňuje mechanickou energii rotujícího hřídele (rotační čerpadlo) nebo pohybujícího se pístu (pístové čerpadlo) na mechanickou energii vody.

**Vodní turbína** je rotační vodní motor, jehož rotující částí je lopatkové oběžné kolo, kterému voda předává svoji mechanickou energii (kinetickou, tlakovou nebo obojí).

**Hydroalternátor** je vícepólový synchronní elektrický rotační stroj, který přeměňuje mechanickou energii hřídele vodního motoru na střídavý elektrický proud. Magnetické pole rotoru hydroalternátoru se tvoří buzením stejnosměrným proudem, který vyrábí budič hydroalternátoru.

**Motorgenerátor** je vícepólový synchronní elektrický rotační stroj zpravidla s dvojím vinutím, který je schopen přeměňovat jak mechanickou energii rotujícího hřídele na energii elektrickou, tak i opačně [1].

### 5.2.2 Podle způsobu přenosu energie vody na oběžné kolo rozeznáváme:

**Rovnotlaké (akční) turbíny**, u nichž se celá polohová energie vody mění už v rozváděcích kanálech na energii kinetickou, která je potom využívána v oběžném kole umístěném nad hladinou dolní vody.

**Přetlakové (reakční) turbíny**, u nichž se v kanálech rozváděcího kola mění jen část polohové energie vody na energii pohybovou. Při výtoku z kanálů rozváděcího kola zůstává ještě zbývající část tlakové energie ve formě hydrostatického tlaku vody, s nímž voda vstupuje do oběžného kola turbíny. Hydrostatický tlak se od vstupu do kanálů oběžného kola směrem k výstupu zmenšuje, čili je v nich přetlak. Využití zbytku energie, kterou odnáší vodní proud opouštějící velkou rychlostí oběžné kolo, umožňuje zpětným sáním sava turbíny. V ní se rychlost vodního proudu plynule zmenšuje [1].

### 5.2.3 Podle směru proudění oběžným kolem vzhledem k hřídeli rozeznáváme:

**Axiální turbíny**, u nichž směr proudění je přibližně rovnoběžný s hřídelem turbíny (např. turbína Kaplanova, vrtulová, přímoproudová).

**Radiální turbíny**, u nichž směr proudění v oběžném kole je přibližně kolmý na osu hřídele. Vodní proud přitom může směřovat buď ke hřídeli, nebo naopak; podle toho mohou být turbíny:

Dostředivé - centripetální (např. pomaloběžná Francisova turbína)

Odstředivé - centrifugální (např. Fourneyronova turbína).

**Radialaxiální turbíny**, u nichž směr proudění v oběžném kole se mění z radiálního na axiální nebo naopak (např. rychloběžná Francisova turbína).

**Diagonální turbína**, u nichž směr proudění v oběžném kole je vzhledem k hřídeli šikmý (např. Deriazova turbína).

**Tangenciální turbína**, u nichž vodní proud působí na oběžné kolo ve směru tečny (např. Peltonova turbína) [1].

### 5.2.4 Peltonova turbína

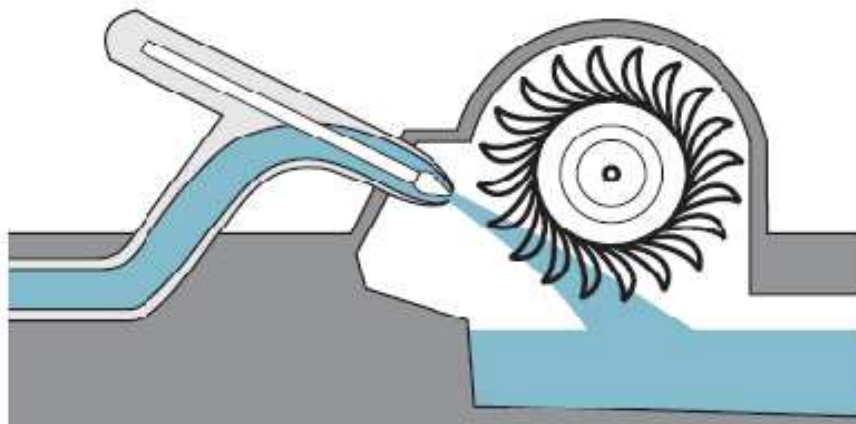
Je reprezentantem rovnotlakých turbín, mezi nimiž má v současné době téměř bezkonkurenční postavení. Voda je přiváděna k turbíně tangenciálně pomocí jedné nebo více trysek, naráží na lopatky elipsoidického tvaru a odtéká volně do odpadu.

Peltonovy turbíny se používají obvykle v lokalitách, kde jsou k dispozici velké spády ( $H = 30$  až  $1800$  m) a malé průtoky. Rozměry hydroalternátorů a tím i celé budovy vodní elektrárny jsou menší než u vodních elektráren stejného výkonu při použití přetlakových turbín.

Konstantní otáčky se zajišťují při kolísavém zatížení agregátu samočinně pracujícím regulátorem, který reguluje průtok na turbínu jehlou v trysce. Při náhlém výpadku agregátoru ze sítě deflektor nebo deviátor usměrní vodní paprsek mimo lopatku oběžného kola, aby nedošlo k jeho roztočení do průběžných otáček. Účinnost malé turbíny je 80 až 85%, u velké 85 až 95%. Výkon je 300 - 350 000 kW.

**Tryska Peltonovy turbíny** má za úkol zajišťovat celistvost vodního paprsku, jeho správné nasměrování a regulaci průtoku vody.

Po opuštění trysky se paprsek vody zužuje vlivem kontrakce, až dosáhne nejužšího místa s nejužším průměrem. Současně se rychlost paprsku zvětšuje. Po dosažení nejužšího místa dochází opět k rozšiřování paprsku vlivem tření vody [1], [4], [11].

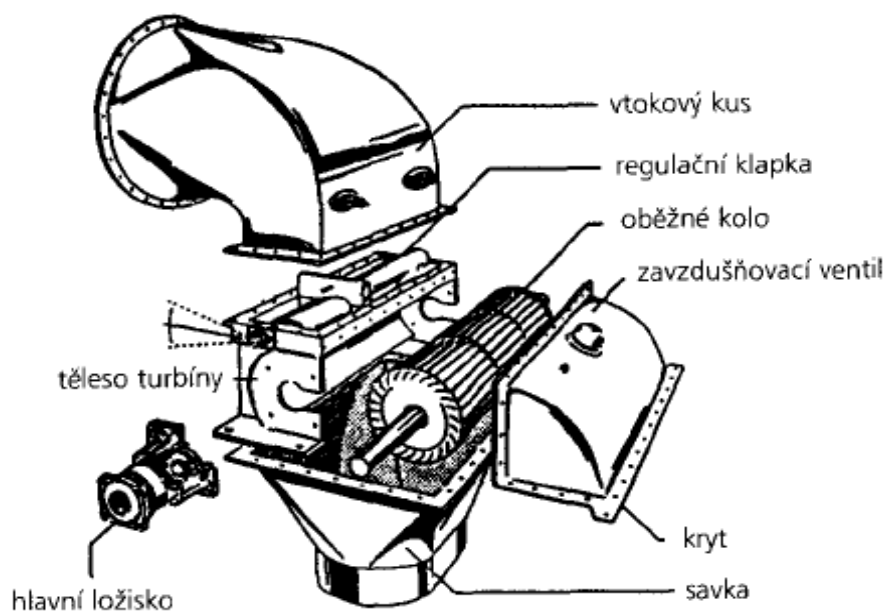


Obr. č. 8 Peltonová turbína [4]

### 5.2.5 Bánkiho turbína

Patří do skupiny rovnotlakých turbín. Pro svou jednoduchou konstrukci se používá zejména u malých vodních elektráren při rozsahu výkonu od 1 do 1000 kW, pro spády od 1,5 do 200 m a průtoky od 50 do 900  $l \cdot s^{-1}$ .

Oběžné kolo je uloženo na horizontální hřídeli, přičemž pevné lopatky jsou upevněny na dvou kruhových discích. Voda se přivádí přes vtokový kus obdélníkového průřezu na část oběžného kola, protéká jím dvakrát a potom volně odtéká do odpadního kanálu. Průtok se reguluje klapkou nebo speciálně upraveným segmentem umístěným těsně před oběžným kolem. Oběžné kolo je zakryto plechovým nebo litinovým krytem, který je zároveň nosnou konstrukcí pro ložiska turbíny. Kryt vytváří turbínovou komoru. Na ní je umístěn zavzdušňovací ventil. Bánkiho turbína dosahují dobré účinnosti i při své jednoduchosti, často  $\eta = 0,85$  [3].

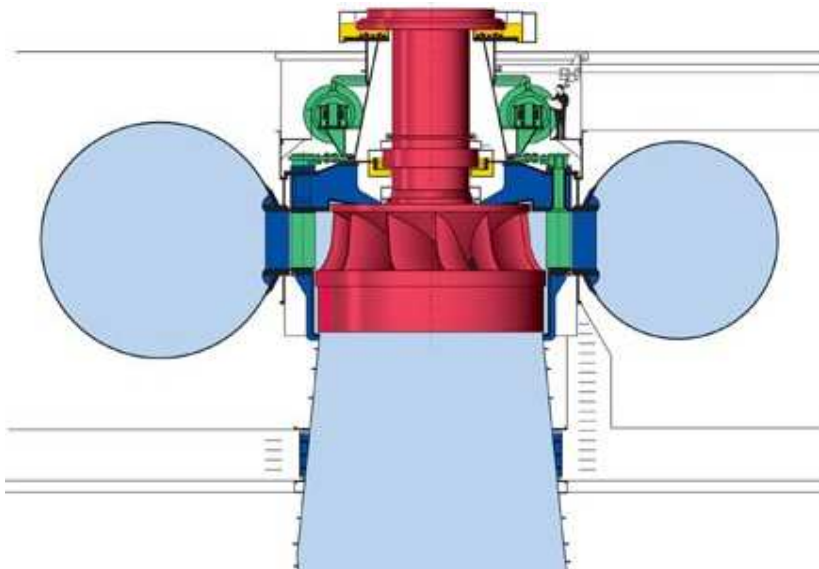


Obr. č. 9 Bánkiho turbína od firmy Ossberger [3]

### 5.2.6 Francisova turbína

Francisova turbína patří do skupiny přetlakových turbín. Pozůstává ze spirály, rozváděcího kola, oběžného kola a savky. Voda se přivádí do zpravidla kovové spirály a z jejího vnitřního obvodu vtéká radiálním směrem do rozváděcího kola, které má po svém obvodu vsazené natáčivé lopatky. Otáčení lopatek je řízeno automatickým regulátorem. Rozváděcími lopatkami lze usměrňovat, regulovat i zcela uzavřít přívod vody na oběžné kolo turbíny.

Oběžné kolo je umístěno uprostřed rozváděcího kola, od něhož jej dělí pouze úzká mezera. V oběžném kole jsou pevné lopatky s radiálně-axiálním uspořádáním - voda vtéká do kola radiálně a vytéká axiálně do savky. Konstrukčně lze turbíny přizpůsobit požadavkům rychloběžnosti ve velkém rozsahu; podle toho rozeznáváme Francisovy turbíny pomaloběžné normální, rychloběžné a expresní. Mají velmi dobrou účinnost a dají se použít pro malé, střední i vysoké spády. Rozsah jejich použití je dnes od 10 do 700 m. Výkon je 200 - 500 000 kW. Nejsou vhodné pro lokality s velkým kolísáním spádu nebo průtoků, protože v oblasti mimo optimálních navrhovaných parametrů mají podstatně nižší účinnost [1], [12].



Obr. č. 10 Francisova turbína [4]

### 5.2.7 Kaplanova turbína

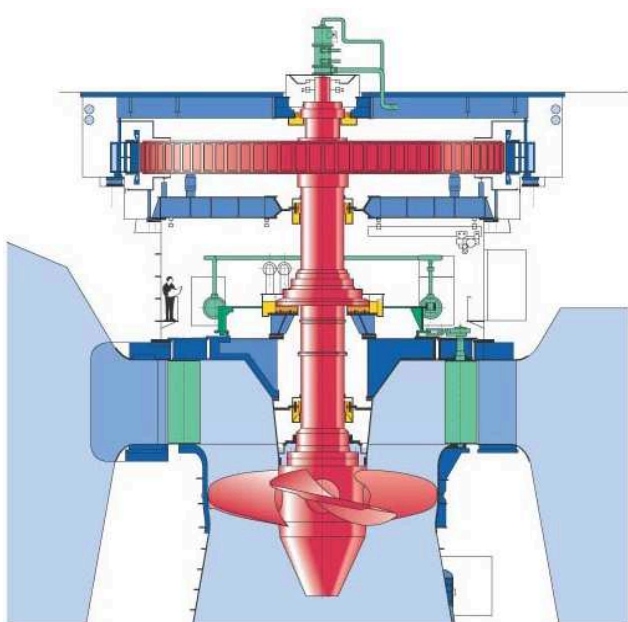
Kaplanova turbína patří do skupiny přetlakových turbín. Vznikla zdokonalením vrtulové turbíny brněnským profesorem V. Kaplanem. Vynález spočíval v tom, že při regulaci turbíny současně s natáčením lopatek rozváděcího kola se natáčí i lopatky oběžného kola. Tím se dá turbína velmi pohotově přizpůsobit změnám průtoku a spádu.

Turbína pozůstává podobně jako Francisova turbína ze spirály, z rozváděcího kola, oběžného kola a savky. Oběžné kolo je umístěno uprostřed pod rozváděcím kolem. Od oběžného kola je voda odváděná savkou do odpadu. Oběžné kolo má malý počet krátkých lopatek (u malých spádů obvykle 3 až 5, u vysokých spádů 8 až 10) rozmístěných radiálně po obvodě náboje. Lopatky jsou natáčivé okolo čepů umístěných na náboji.

Typickým pro Kaplanovu turbínu je kromě natáčivých lopatek též mohutný náboj na konci hřídele, který zabírá přibližně 1/3 průměru vstupu do savky. Lopatky oběžného kola se natáčí pomocí hydraulického mechanismu umístěného v duté hřídeli nebo přímo v náboji oběžného kola. Jejich poloha je ovládána regulátorem a při normálním provozu je vázána na polohu rozváděcích lopatek (pomocí tzv. kulisy). Regulátor podle změny otáček agregátu zavírá nebo otvírá lopatky rozváděcího

kola a přitom současně natáčí do optimální polohy i lopatky oběžného kola. Tím se dosahuje při různých spádech a průtocích dobré účinnosti soustrojí.

Kaplanovy turbíny jsou vhodné pro využívání malých a středních kolísavých spádů od 1,5 m až do 70 m. Dosahují nejvyšší účinnosti ze všech typů vodních turbín a to víc než 90%. Výkon je 200 - 200 000 kW [1], [4], [10].



Obr. č. 11 Kaplanová turbína [4]

### 5.2.8 Vrtulová turbína

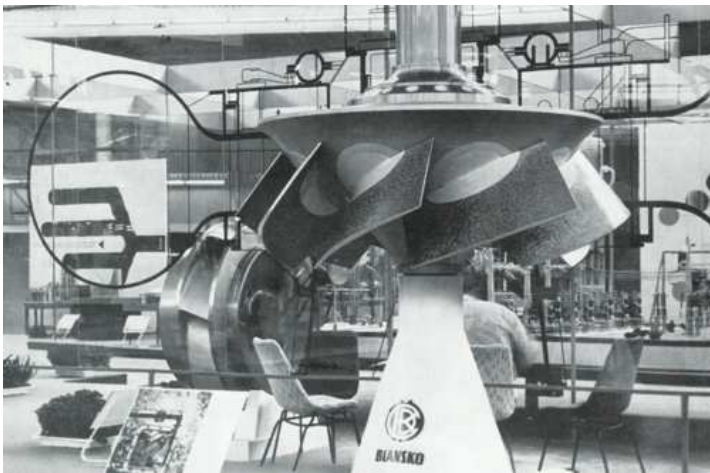
Vrtulová turbína patří do skupiny přetlakových turbín. Je obdobně řešena jako Kaplanova turbína, avšak nemá natáčivé lopatky oběžného kola.

Je proto vhodná v případech málo proměnného spádu a průtoku. Odpadá u ní komplikované hydraulické ovládní lopatek oběžného kola, takže je konstrukčně jednodušší, a proto levnější. Dnes se používá u malých vodních elektráren [1].

### 5.2.9 Diagonální (Deriazova) turbína

Má podobně jako Kaplanova turbína natáčivé lopatky oběžného kola, které jsou uloženy na kónusovém náboji. Výkon je 2000 - 150 000 kW. Používá se pro spády od 20 - 65 m, zejména při reverzibilním provozu přečerpávacích vodních elektráren se smíšenou akumulací. Plní tedy funkci turbíny i čerpadla [1],[7].



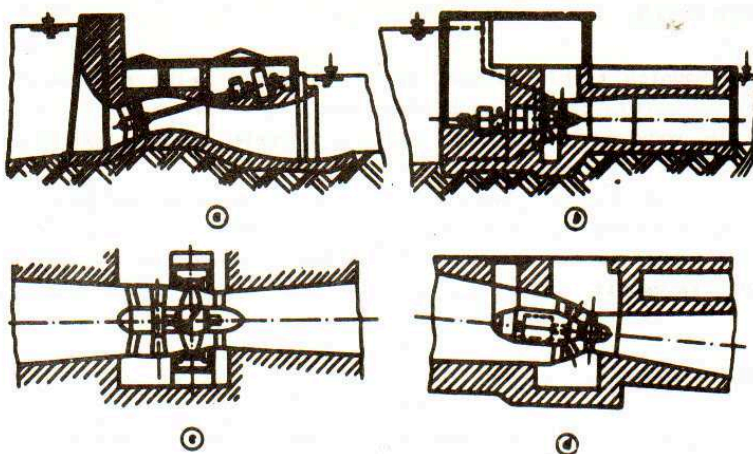


Obr. č. 12 Diagonální (Deriazova) turbína [5]

### 5.2.10 Přímoproudová turbína

Přímoproudová turbína patří do skupiny přetlakových turbín. Má oběžné kolo řešeno podobně jako turbína Kaplanova nebo vrtulová. Nejčastěji se umísťuje spolu s obtékaným generátorem přímo do tvarovaného potrubí, kterým se přivádí voda (obr. č. 13 - d). Generátor se nejčastěji umísťuje v uzavřeném pouzdře do vtoku před turbínou, nebo při esovitém zakřivení potrubí do strojovny nad savku (obr. č. 13 - a). Spojení turbíny s generátorem bývá buď přímé, nebo převodem do rychla.

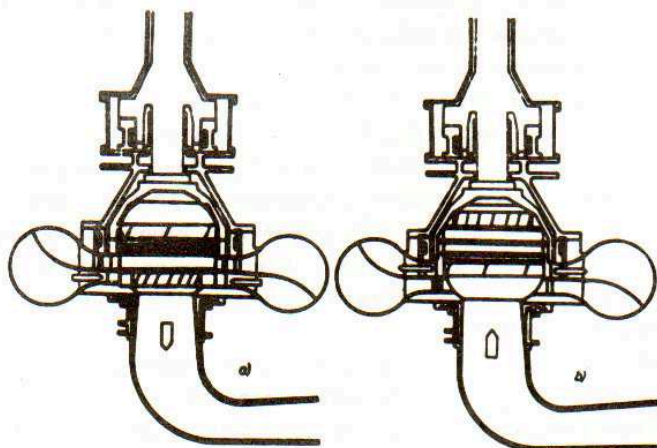
Přímoproudové turbíny se používají pro malé spády od 1,5 m do 15 m, max. do 20 m. Jejich použití umožňuje podstatné snížení investičních nákladů (až o 25%), protože kladou menší nároky na šířku jednotlivých elektrárenských bloků, na hloubku jejich zakládání, i na prostory ve strojovně. Částečná nevýhoda spočívá v jejich malé provozní stabilitě, která je způsobena zejména snahou o zmenšování průměru obtékaného generátoru, a tím i jeho setrvačných hodnot [1].



Obr. č. 13 Různé typy přímoproudových turbín [1]

### 5.2.11 Reversibilní turbína

Vznikly na základě nových požadavků kladených na soustrojí přečerpávacích vodních elektráren. Nejprve se podařilo zajistit reversibilní schopnost u turbín Francisových, diagonálních a přímoproudových s tím, že při jednom smyslu otáčení pracují jako turbíny a při opačném smyslu otáčení jako čerpadlo. Zkušenosti z provozu těchto dvousměrových reversibilních turbín si později vynutily vývoj jednosměrných reversibilních turbín. Z nich za technicky nejdokonalejší lze považovat jednosměrnou reversibilní turbínu typu HONE. Tato turbína má dvě oběžné kola - turbínové a čerpadlové, které se dají do pracovní polohy přetočit i za chodu pomocným servomotorem [1].



Obr. č. 14 Reversibilní turbína HONE (a – turbínový provoz, b – čerpadlový provoz) [1]

### 5.3 Kavítace turbín

Kavítace je souhrn nepříznivých jevů při proudění vody, které jsou vyvolány podtlaky a způsobují narušování obtékaných materiálů. Tyto jevy, které jsou pro obtékané konstrukce nebezpečné vznikají v místech tvoření podtlaků. U většiny konstrukcí se jim lze vyhnout vyloučením, nebo omezením podtlaků. U konstrukcí turbín je to poněkud komplikovanější, protože např. vznik podtlaků pod oběžným kolem turbíny umožňuje zvýšit využití kinetické energie proudu vody a proto se navrhují savky turbíny, které podtlaky pod turbínou zvětšují. Toto zvýšení podtlaků nesmí ale přesáhnout určitou mez, která se nazývá kavitační. Při překročení této meze vzniká kavítace [1].



Obr. č. 15 Francisova turbína poškozená kavítací [6]

## 5.4 Regulátory vodních turbín

Malé vodní elektrárny s nižšími instalovanými výkony mají většinou hydroagregáty s asynchronními generátory. Ty nepotřebují regulátor otáček, protože frekvenci (50 Hz) udržuje elektrizační soustava, do níž jsou připojeny.

MVE s větším výkonem než 500 kW však ve většině případů vyžadují použití synchronního generátoru s regulátorem.

Generátor má zabudován určitý počet pólových dvojic. Má-li vyrábět proud s danou frekvencí, musí mít konstantní otáčky, protože změna frekvence není přípustná. Když se v síti sníží odběr, klesá zatížení generátoru, v důsledku čehož se celý hydroagregát snaží zvýšit otáčky. Proto musí mít hydroagregát speciální zařízení - regulátor, který reaguje na změny otáček a ihned v potřebné míře přivře nebo pootevře lopatky rozváděcího kola turbíny nebo jiný regulační uzávěr. Tím se změní průtok turbínou na hodnotu odpovídající požadovanému výkonu.

Regulátor má kromě funkce zabezpečení konstantních otáček za úkol i automatické uzavření rychlouzávěru na začátku tlakového potrubí nebo uzávěru na vtoku u nízkotlaké MVE v případě, že dojde k výpadku elektrárny z provozu v důsledku poruchy v elektrické síti. Je to velmi důležitá ochranná funkce, neboť v opačném případě by došlo k roztočení odlehčeného stroje na velmi vysoké otáčky, při nichž by mohlo dojít k havárii stroje roztržením rotujících částí v důsledku velké odstředivé síly.

Regulačními orgány u jednotlivých typů turbín jsou:

- u nízkotlakých Francisových a vrtulových turbín - rozváděcí lopatky,
- u vysokotlakých Francisových turbín - rozváděcí lopatky a synchronní ventil,
- u Kaplanových a diagonálních turbín - rozváděcí lopatky i lopatky oběžného kola,
- u Peltonových turbín - regulační jehlový uzávěr a odklápeč paprsku (deviátor) nebo jeho odřezávač (deflektor).

Dvojitá regulace Kaplanových turbín zabezpečuje regulování otáček a takovou vazbu mezi otevíráním rozváděcích lopatek a polohou lopatek oběžného kola, při níž se dosahuje nejlepší účinnosti.

Dvojitá regulace Francisových turbín zabezpečuje regulování otáček agregátu a regulování tlaku vody ve spirále turbíny a tlakovému přiváděči při rychlém odstavení hydroagregátu. Otáčky se regulují otevíráním, resp. zavíráním rozváděcích lopatek. Rychlým uzavřením přiváděče však může vzniknout hydraulický ráz. Rychlé uzavření je však potřebné, aby se hydroagregát při odlehčení nedostal do vysokých (tzv. průběžných) otáček, při kterých hrozí poškození stroje vlivem odstředivých sil. Tím, že regulátor současně s uzavíráním regulačního kruhu otvírá synchronní ventil na potrubí odbočující od spirálové skříně do odpadu, zamezuje se vzniku přímého hydraulického rázu. Úbytek průtoku turbínou se nahradí odtokem přes synchronní ventil, který se potom plynule v delším časovém intervalu uzavře.

Peltonova turbína se reguluje zasouváním nebo vysouváním kuželové jehly v hrdle trysky. Tím se mění výtokový mezikruhový průřez trysky. Pohyb jehly nemůže být velmi rychlý, aby nebyl vyvolán hydraulický ráz. Proto se i v tomto případě používá dvojitá regulace. Jestliže je třeba turbínu rychle odstavit, docílí se toho pomocí odklápeče vodního paprsku, který se působením regulátoru rychle zasune do vytékajícího vodního paprsku a odchýlí ho úplně nebo částečně od lopatek turbíny. Po plynulém pomalém uzavření trysky jehlou se odklápeč znovu odsune od výtokového otvoru trysky. Hodnota hydraulického rázu se připouští nejvíce do 15 až 20% normálního zatížení od hydrostatického tlaku. Proto by uzavření trysky nemělo být rychlejší než 25 sekund. Odklápeč vychýlí vodní paprsek přibližně za 3 sekundy [3].

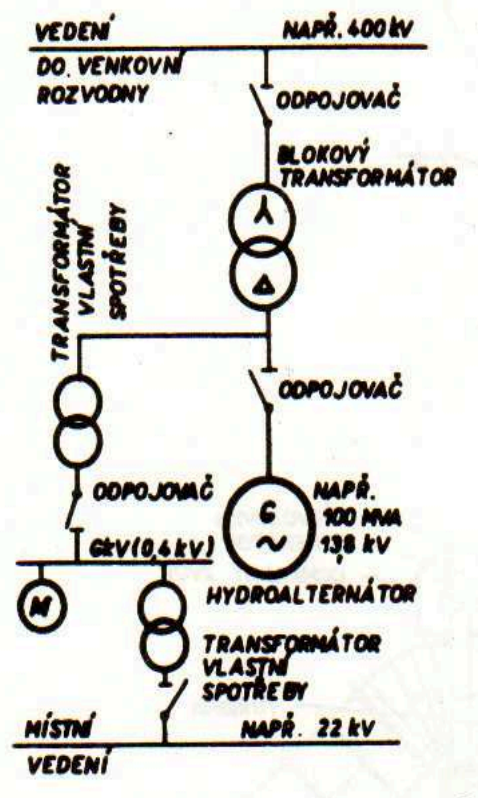
## 5.5 Převody

Energie rotující hřídele turbíny se může na generátor přenášet přímo (společná hřídel), nebo pomocí převodu, který zároveň umožňuje změnu otáček potřebných pro zvolený generátor. V případě asynchronního motoru ve funkci generátoru je potřebné, aby výsledné otáčky byly vyšší než synchronní (přibližně 1,1 násobek otáček synchronních). Nejvýhodnější je přímé spojení turbíny a generátoru - pokud to dovolí dosahované otáčky. U MVE se přímé spojení pevnou spojkou používá obvykle u Peltonových turbín a jen zřídka i u Bánkiho turbín v lokalitách s většími spády. Při použití jiných typů vodních turbín se v MVE obvykle nedosahuje dostatečně velkých otáček turbíny na přímé spojení, které by vyhovovalo konstrukcím dostupným asynchronním motorům. Tento problém je nejožehavější u vodních kol, protože doposud není technicky zvládnutý velký převod do rychla. Proto se vodní kola používají zřídka k výrobě elektrické energie. Převody do rychla pro MVE mají mít následující vlastnosti:

- velkou provozní spolehlivost,
- dlouhou životnost,
- vysokou účinnost,
- minimální prostorové nároky,
- nenáročnost údržby,
- nízkou cenu [3].

## 6 ELEKTROTECHNICKÁ ČÁST VODNÍCH ELEKTRÁREN

Základní informaci o elektrickém zařízení elektrárny dává hlavní elektrické schéma elektrárny a schéma vlastní spotřeby. Z obr. č. 16 je patrné, že k hlavním prvkům elektrického systému patří: hydroalternátor, vývody z alternátoru, rozvodna generátorového napětí, blokový transformátor, vývody z transformátoru, venkovní rozvodna, transformátory vlastní spotřeby, elektrické motory hlavních zařízení (jeřáby, čerpadla atd.), budiče alternátorů, a pomocná zařízení (odpojovače, vypínače, jističe, měřicí a regulační zařízení ap.). U přečerpávacích vodních elektráren se schéma doplňuje o motor pohánějící čerpadlo nebo reverzibilní turbínou [1].



Obr. č. 16 Schéma zapojení vodní elektrárny [1]

## 6.1 Hydroalternátory

V alternátoru se mění mechanická energie rotující hřídele na elektrickou energii. Hydroalternátory jsou nízkootáčkové alternátory s vyniklými póly.

Otáčky hydroalternátoru jsou závislé na typu a otáčkách turbíny a zároveň na kmitočtu vyráběného elektrického proudu. Konstrukce hydroalternátoru musí vycházet z počtu pólů  $p$  podle vzorce:

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{3000}{n} \quad (17)$$

$f$  - kmitočet [Hz], u nás 50 Hz

$n$  - otáčky hydroalternátoru

Počet pólů (často se používá počet pólpárů resp. pólových párů) musí být celé číslo, a tak lze pro návrh hydroalternátoru využít synchronní otáčky  $n_s$  z následující tabulky č. 1.

Počet pólpárů	1	2	3	4	5	6	8
$n_s$ [min <sup>-1</sup> ]	3000	1500	1000	750	600	500	375
Počet pólpárů	10	12	14	16	20	24	28
$n_s$ [min <sup>-1</sup> ]	300	250	214	187,5	150	125	107,1
Počet pólpárů	30	32	36	40	44	48	52
$n_s$ [min <sup>-1</sup> ]	100	93,7	83,3	75	68,1	62,5	57,7

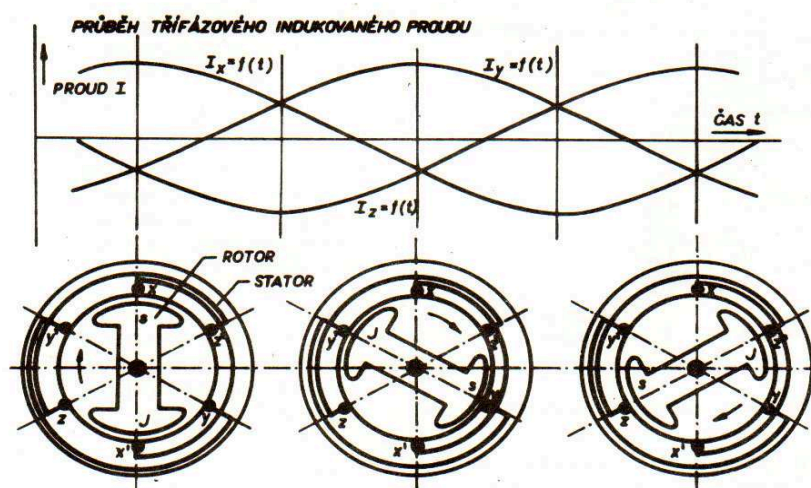
Tab. č. 1 Orientační tabulka hodnot [1]



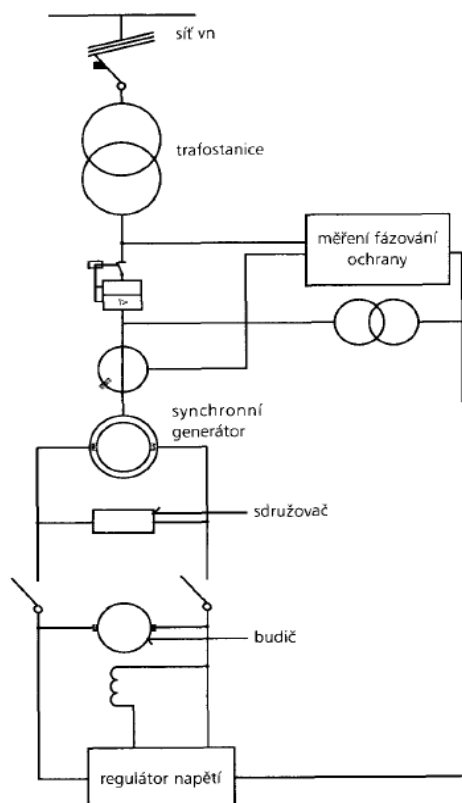
Pro vodní elektrárny velkých výkonů jsou vhodné synchronní otáčky  $n_s = 500, 600, 750 \text{ min}^{-1}$ . U menších soustrojí, když návrhové otáčky vycházejí menší než  $n_s = 100 \text{ min}^{-1}$ , je možné navrhnout převod do rychla místo pevné spojky mezi alternátorem a turbínou.

Elektrická energie se v alternátoru (synchronní generátor) vyrábí elektromagnetickou indukcí. Budícím stejnosměrným proudem se vytvoří z rotoru elektromagnet se severním a jižním pólem. Otáčením tohoto elektromagnetu ve statoru se mění poloha severního a jižního pólu, tím se mění magnetický tok v jednotlivých statorových cívkách a indukuje se v nich střídavý elektrický proud.

Na obr. č. 17 je schematicky znázorněn trojfázový dvojpólový alternátor s rotorem postupně ve třech polohách. Maximální elektrický proud se indukuje ve vinutí, pod kterým se právě nachází magnetický pól rotoru.



Obr. č. 17 Vztah polohy rotoru a statoru alternátoru a indukovaného proudu [1]



**Obr. č. 18 Schéma zapojení synchronního generátoru na síť [3]**

Konstrukčně je aktivní část statoru zavěšena v pouzdře, vyrobená ze svařovaného plechu, vyztužena žebry. Je složená z legovaných plechů silných 0,35 až 0,5 mm od sebe izolovaných a stažených nemagnetickými hřebíky. Ve svazcích těchto plechů jsou drážky pro vinutí a chladicí otvory. Konstrukce statoru musí být pevně spojena a vyztužena, aby odolala velkým radiálním a axiálním silám, vznikajícím při elektrických přechodných jevech (např. při zkratu).

Rotory hydroalternátorů jsou magnetová kola s vyniklými póly, která se skládají z ocelových plechů 1 až 1,5 mm silných, v jejichž pólových nástavcích jsou drážky pro tyčová vinutí, tvořící s čelními kruhy tlumící vinutí. U rotorů s vyšší obvodovou rychlostí se vyrábějí póly z lité oceli. Tlumící zařízení rotorů slouží u motorgenerátorů v přečerpávajících vodních elektrárnách k asynchronnímu rozběhu stroje.

Budicí soustavy hydroalternátoru se skládají ze zdrojů budících proudů, regulátorů buzení a systémů odbuzování (odbuzovačů). Zdroje buzení musí být provozně spolehlivé, plynule regulovatelné a rychle měnící budící napětí alternátoru. Budicí soustavy s rotačním budičem tvoří budič, který je vlastně derivačním stejnosměrným dynamem namontovaným na hřídeli alternátoru. U vyšších výkonů se užívají alternátory, jejichž střídavé napětí se musí usměrňovat na stejnosměrné budící napětí výkonnými diodami nebo tyristory. Někdy je nutno navrhnout ještě pomocné budiče pro buzení hlavních budičů.

Při vnitřních poruchách alternátoru (zkrat, zemní spojení), při zkratu na vývodech alternátoru a také při poruše blokového transformátoru, musí systém odbuzení co nejrychleji odvést nashromážděnou elektromagnetickou energii ze stroje. Bylo vyvinuto několik odbuzovacích systémů, pro nižší výkony odbuzovač s paralelním zhášecím odporem, pro vyšší výkony např. odbuzovač se zhášecí komorou.

Pokud alternátor pracuje do společné sítě, je nutné před připojením alternátoru nafázovat. Používají se dva způsoby: přesné fázování (synchronní fázování) nebo asynchronní fázování (samosynchronizace).

Při přesném fázování musí být splněny tyto podmínky:

- shoda velikosti napětí alternátoru a sítě;
- nulový fázový posun mezi napětím alternátoru a sítě;
- shoda kmitočtu napětí alternátoru a sítě;
- shoda sledu fází alternátoru a sítě, a pak teprve lze připojit alternátor k síti.

V průběhu samosynchronizace se nabuzený hydroalternátor roztočí bez zatížení na otáčky blízké synchronním, zapne se na síť a okamžitě se přibudí. Vzniknou sice proudové a momentové rázy, ale alternátor se rychle přifází jednoduchou manipulací.

Ztráty v alternátoru se dělí na ztráty mechanické (tření v ložiscích a ventilační), ztráty ve vinutí rotoru a statoru a v aktivním železe. Tyto ztráty činí 2% až 4%.

Chlazení hydroalternátoru menších výkonů je buď otevřeným oběhem vzduchu, nebo uzavřeným oběhem [1].

## 6.2 Asynchronní generátor

Asynchronní generátor se používá především v režimu výroby a dodávky elektrické energie MVE do pevné sítě. U samostatného provozu do autonomní sítě se s použitím asynchronního generátoru nepočítá. Asynchronní generátory mají stejnou konstrukci jako asynchronní motory. Stator má trojfázové střídavé vinutí, stejné jako synchronní stroje. Rotor může být vinutý s kroužky, ale používá se i rotor s klecovým vinutím, které neobsahuje žádné citlivé součásti.

Když rotor dosáhne synchronních otáček s magnetickým polem, nic se neindukuje. Proto se rotor v motorovém chodu otáčí s otáčkami o něco nižšími, než jsou otáčky synchronní - pracuje se skluzem.

Jestliže se dodá motoru připojenému k pevné síti na hřídel mechanický moment tak, aby se otáčky rotoru zvýšily nad otáčky magnetického pole (skluz bude záporný), bude rotor brzděn a přitom bude do sítě dodávat činný výkon. Ze sítě však bude současně odebírat jalový výkon pro vlastní magnetizaci. Odběr jalového výkonu ze sítě je nevýhodný, protože ji zatěžuje zvýšeným proudem. Proto se kompenzuje kondenzátory, ale to přináší nebezpečí vzniku přepětí na svorkách paralelní kombinace kondenzátor - generátor, samobuzením při výpadku sítě a následném zvýšení otáček hydroagregátu. Lze tomu zabránit rozpojením uvedené kombinace nebo dimenzováním kompenzačního výkonu kondenzátorů na podkritickou hodnotu, tj. na výkon, při kterém nenastane samobuzení při chodu naprázdno.

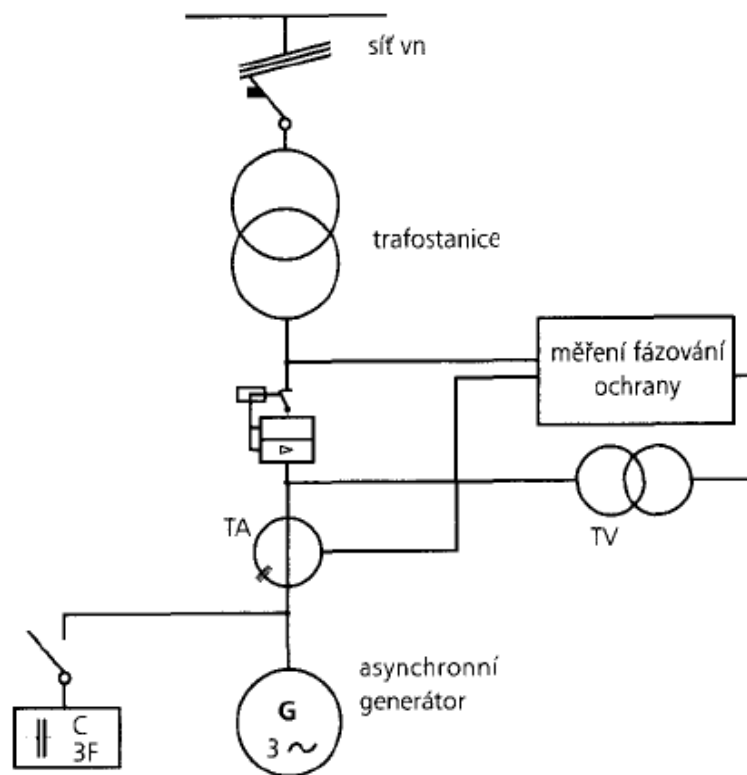
Fázování generátoru se uskutečňuje jednoduchým připojením generátoru k síti při dosažení přibližně synchronních otáček. Proudový naráz v síti je 2,5 až 3krát větší, než je jmenovitý proud.

Použitím asynchronních generátorů se zjednodušují ostatní elektrická zařízení, zmenšuje se jejich hmotnost, a tím se i snižuje jejich cena. Nevýhodou je odběr jalového výkonu, neschopnost samostatného chodu a nižší účinnost při částečném výkonovém zatížení.

Asynchronní stroje se zpravidla dimenzují výkonově co nejblíže k maximálnímu výkonu turbíny. Jestliže je ve funkci asynchronního generátoru použit asynchronní motor, je možné ho zatížit elektrickým výkonem rovnajícím se jeho příkonu, tedy jmenovitým proudem. Prakticky se hodnota maximálního výkonu na svorkách generátoru získá jako podíl jmenovitého výkonu a jeho účinnosti.



Dimenzování mechanických částí (ložisek, hřídele) stejně jako trvalý provoz při záporném skluzu (se zvýšenými otáčkami) a schopnost vyhovět mechanicky při průběžných otáčkách je třeba konzultovat s výrobcem [3].



Obr. č. 19 Schéma zapojení asynchronního generátoru na síť [3]

## 6.3 Transformátory

Přenos elektrické energie na velké vzdálenosti je hospodárný tehdy, když se volí vysoké napětí, při kterém jsou pro přenášený výkon minimální průřezy vedení, minimální náklady na rozvodná zařízení a minimální přenosové ztráty. Transformátor se skládá z uzavřeného magnetického obvodu, z primárního a sekundárního vinutí.

Transformátory rozdělujeme na hlavní, které složí k vyvedení výkonu do elektrizační sítě a transformátory pro vlastní spotřebu, které zásobují zařízení, zajišťují provoz elektrárny. Hlavní transformátory jsou buď blokové (přímo spojené s alternátorem) nebo spojovací (sloužící pro spojení soustav dvou napětí).

Výkon blokových transformátorů je dán zdánlivým výkonem hydroalternátoru.

Počet transformátorů odpovídá počtu alternátorů, popř. se navrhuje záložní blokový transformátor. Používají se trojfázové transformátory; tři jednofázové transformátory se navrhuje pro bloky velkých výkonů [1].

## 6.4 Provozní výhody vodních elektráren

Vodní elektrárny mají proti tepelným elektrárnám řadu výhod:

- rychlé a hospodárné spouštění a odstavení soustrojí;
- výborné dynamické vlastnosti při krytí náhlých změn zatížení;
- výhodné využití jako zatěžovací (u PVE) a poruchová rezerva;
- kompenzační provoz soustrojí;
- jednoduchý technologický proces, který se dobře udržuje a automatizuje;
- vlastní spotřeba elektrické energie u vodních elektráren 1% až 2% (u tepelných přes 10%),
- vodní energie se přeměňuje na elektrickou s nejvyšší účinností dosud známých energetických přeměn na vyšší druh energie [1].

## 7 PROVOZ MALÝCH VODNÍCH ELEKTRÁREN

### 7.1 Řízení malých vodních elektráren

Při provozu malých vodních elektráren lze principiálně použít řízení:

- ruční,
- částečné nebo plně automatizované,
- lokální nebo dálkové.

Ruční řízení provozu se dnes používá jen zcela výjimečně, a to prakticky pouze u některých domácích MVE, zřízených v bezprostředním sousedství uživatele, popř. při dostatečně ustálených průtokových poměrech. Hlavním důvodem bývá úspora investičních nákladů.

U domácích MVE se již běžně instaluje automatika, která má zvláštní význam zejména u elektráren budovaných v odlehlých oblastech, kde by zabezpečení stálé nebo i občasné obsluhy bylo obtížné a neefektivní.

Možnost zajištění automatizovaného řízení patří mezi nejvýznamnější výhody vodních elektráren. Pro MVE všech kategorií v celém rozsahu instalovaných výkonů je výrobci nabízená, dodávaná a instalována spolu s technologií i příslušná automatika, umožňující prakticky bezobslužný provoz.

Určité problémy mohou ovšem nastat v mimořádných situacích, např. při enormním ucpáním česlí za podzimního transportu padajícího listí, během povodní, při tvorbě ledu v zimním mrazovém období. V těchto mimořádných případech jsou operativní opatření a zásahy nezbytné.

V současné době se pro monitorování a řízení provozu MVE využívají vizualizační programové systémy. Pomocí nich lze proces sledovat a ovládat [3].

## 7.2 Manipulační a provozní řády

MVE je hospodářským dílem. Provoz takového díla je řízen manipulačním řádem a provozním řádem.

Manipulační řád je přehledný a jednoznačný soubor předpisů, zásad a směrnic, které vycházejí z povolení vodohospodářského orgánu (stavební povolení).

Upravuje nakládání s povrchovými vodami z hlediska účelného a hospodárného využití vody na díle, ochrany díla a zlepšení jakosti vody.

Manipulačním řádem se při provozu MVE řídí tyto činnosti:

- odběr vody z vodního toku nebo z vodní nádrže bez ohledu na to, zda se voda vrací zpět do vodního toku, nebo ne,
- vypouštění nebo přečerpávání vody z odvodňovacích zařízení do vodního toku,
- manipulace s hladinami na vodném díle a s objemem vody v prostorech zdrží, resp. nádrží při jakýchkoli průtocích v toku.

Manipulační pravidla musejí zahrnovat všechny možné průtokové situace, proměnlivost klimatu a vlivy okolního prostředí. K nejvýznamnější provozním stavům, kterým je nutno věnovat zvýšenou pozornost, patří:

- provoz za minimálních průtoků,
- provoz během povodních, obvykle provázených intenzivním pohybem splavenin, v zimním nebo předjarním období i ledovými jevy,
- provoz v zimním mrazovém období.

Provozní řád MVE stanovuje základní postupy a podmínky pro uvedení MVE do provozu, vlastní provoz a údržbu zařízení MVE a jejího dalšího příslušenství tak, aby byl provoz zajištěn jako hospodárný a bezporuchový a rovněž aby byla zajištěna bezpečnost obsluhy i samotných zařízení [3].

## 7.3 Provoz ve zvláštních podmínkách

Kromě běžného provozu existují i mimořádné provozní stavy, při nichž dochází ke zmenšení užitkovosti MVE, příp. i k jejímu úplnému odstavení. K těmto mimořádným provozním stavům patří:

- provoz při nízkých průtocích,
- provoz při povodních,
- zimní provoz [3].

### 7.3.1 Provoz při nízkých průtocích

Při nízkých průtocích se projeví následující problémy:

- MVE pracuje, pokud průtoky neklesnou pod minimální hlnost turbíny. MVE přestává pracovat, když je překročena minimální hlnost turbíny. V tomto případě je třeba zabezpečit trvalý sanační (biologický) průtok, který nesmí být redukován např. akumulací objemu vody nad rámec hodnot povolených vodohospodářských rozhodnutí,
- v případě, že MVE nepracuje, je potřebné podle možností zlepšovat kvalitu vody provzdušňováním přepouštěných průtoků přes jiné objekty - nejlépe přepadem přes všechny hradičí konstrukce jezu,

- v derivačních přivaděčích (zejména s volnou hladinou) při odstavené MVE z důvodu malých průtoků je třeba zajistit výměnu vody jejím vypouštěním jalovou výpustí, rybovodem nebo v krajním případě i přes odstavenou turbínu [3].

### 7.3.2 Provoz při povodních

Při povodni je většina objektu MVE vystavena zvýšenému zatížení. Vzniká riziko poškození objektů:

- výmoly jsou nebezpečné zejména z hlediska stability objektů a některých jejich částí,
- nadměrné zanesení vtoků a ucpání česlí kmeny stromů, křovím a jinými plovoucími předměty představuje rovněž riziko poškození MVE.

Je třeba si uvědomit, že v mnoha případech jsou objekty MVE během povodně pro obsluhu nepřístupné, a je proto zapotřebí spolehnout se na činnost automatiky. Je důležité, aby uzávěry výpustí a jezových polí napojených na automatiku byly v dobrém technickém stavu.

U mikroelektráren a minielektráren je třeba počítat s přívalovými povodněmi, které mohou několikanásobně převýšit uvažovaný navrhovaný průtok. Objekty je zapotřebí v těchto případech řešit tak, aby se případné škody minimalizovaly na únosnou míru ve vztahu k pravděpodobnosti výskytu těchto povodní.

Nánosy se vytvářejí ve vtocích, v přivaděčích i v odpadech MVE. Z toho mohou pro provoz MVE plynout některé problémy:

- snížení výroby elektrické energie,
- koncentrace chemických prvků v usazeninách,
- zhoršení hospodárnosti provozu z důvodu vysokých provozních nákladů [3].

### 7.3.3 Zimní provoz

Ledové jevy způsobují téměř na všech vodních dílech těžkosti, s nimiž si musí provozovatel poradit. Jsou to zejména:

- ledové zácpy z nahromaděných ledových ker na koncích vzdutí,
- namrzání ledu na česlích a na uzávěrech,
- ucpání česlí ledovou tříští a ledovými krami,
- omezení průtoku v derivačních přivaděčích.

Na mnoha tocích a derivačních přivaděčích je velkým problémem tvorba vnitrovodního a dnového ledu. Jeho nahromadění může částečně nebo i úplně zamezit průtok vody derivačním kanálem či ucpat jemné česle. Při větším množství se nedá odstranit a způsobuje často i úplné zamrznutí vtoků, protože turbíny se při snížení průtoků pod  $Q_{\min}$  automaticky odstaví. V některých případech se v extrémních podmínkách, i přes vyšší investiční náklady, derivační přivaděče s volnou hladinou budují zakryté a tepelně izolované přísypem patřičné vrstvy zeminy.

Snížit namrzavost česlí je možné:

- použitím laminátových prutů nebo povrchovou úpravou kovových prutů silikoorganickými sloučeninami,
- vyhříváním horní opěrné části česlí přiváděním tepla od generátorů,
- přímým vyhříváním česlí (jen u větších a významnějších vodních elektráren).

Provozu MVE při mimořádných provozních stavech je potřeba věnovat zvýšenou pozornost. Tyto stavy se většinou vyskytují a trvají jen několik dní v roce, může však při nich dojít ke vzniku vážných škod na zařízeních a objektech MVE, resp. celého vodního díla. Přitom však vhodnou manipulací se dá těmto škodám často předejít. Tyto stavy se obvykle nedají řešit automatikou. Je při nich potřebná přítomnost poučeného pracovníka obsluhy. Vzhledem k tomu, že tyto stavy (kromě letních bouřkových povodní) nenastávají náhle, dá se při znalosti následností přírodních jevů včas na tyto stavy reagovat vhodnou přípravou [3].

## 8 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ

K zabránění zavlečení zpětného napětí do sítí PDS je zapotřebí zajistit technickými opatřeními, aby připojení vlastní výroby k síti PDS bylo možné pouze tehdy, když jsou všechny fáze sítě pod napětím.

K připojení může být použit jak spínač, který spojuje celé zařízení odběratele se sítí, tak i spínač, který spojuje generátor popř. více paralelních generátorů se zbylým zařízením odběratele. Zapnutí tohoto vazebního spínače musí být blokováno do té doby, dokud není na každé fázi napětí minimálně nad rozběhovou hodnotou podpět'ové ochrany. K ochraně vlastní výroby se doporučuje časové zpoždění mezi obnovením napětí v síti a připojením výroby v rozsahu minut.

Časové odstupňování při připojování generátorů a blokových transformátorů zdroje je zapotřebí odsouhlasit s PDS [9].

### 8.1 Zvýšení napětí

Zvýšení napětí vyvolané provozem připojených výroben nesmí v nejnepríznivějším případě (přípojném bodu) překročit 2% pro výroby s přípojným místem v síti vn a 110 kV ve srovnání s napětím bez jejich připojení, současně nesmí být překročeny limity napětí v předávacím místě zdroje.

$$\Delta u_{vn,110} \leq 2\%, \quad (18)$$

pro výroby s přípojným místem v síti nn nesmí překročit 3%, tedy

$$\Delta u_{nn} \leq 3\%. \quad (19)$$

Úroveň napětí musí být posouzena s ohledem na výši skutečné hodnoty napětí v předávacím místě.

Pokud je v síti nn a vn jen jedno přípojně místo, je možné tuto podmínku (19), (20) posoudit jednoduše pomocí zkratového poměru výkonů

$$k_{k1} = \frac{S_{kv}}{\sum S_{Amax}}, \quad (20)$$

kde  $S_{kv}$  je zkratový výkon v přípojném bodě a  $\sum S_{Amax}$  je součet maximálních zdánlivých výkonů všech připojených/plánovaných výroben.

V případě jediného předávacího místa v síti bude podmínka pro zvýšení napětí dodržena vždy, když zkratový poměr výkonů  $k_{k1}$  je pro výroby s předávacím místem v síti vn

$$k_{k1vn} \geq 50, \quad (21)$$

podobně pro výroby s předávacím místem v síti nn

$$k_{k1nn} \geq 33, \quad (22)$$

Pokud je síť nn a vn silně induktivní, pak je posouzení pomocí činitele  $k_{k1}$  příliš konzervativní, tzn., že dodávaný výkon bude silněji omezen, než je zapotřebí k dodržení zvýšení napětí. V takovém případě je zapotřebí provést výpočet s komplexní hodnotou impedance sítě s jejím fázovým úhlem  $\psi_{kv}$ , který poskytne mnohem přesnější výsledek.

Podmínka pro maximální výkon pak je pro výroby s předávacím místem v síti vn

$$S_{Amax} \leq \frac{2\% \cdot S_{kv}}{|\cos(\psi_{kv} - \varphi)|} = \frac{S_{kv}}{50 \cdot |\cos(\psi_{kv} - \varphi)|}, \quad (23)$$

pro výroby s předávacím místem v síti nn

$$S_{A \max} \leq \frac{3\% \cdot S_{kV}}{|\cos(\psi_{kV} - \varphi)|} = \frac{S_{kV}}{33 \cdot |\cos(\psi_{kV} - \varphi)|}, \quad (24)$$

kde  $\varphi$  je fázový úhel mezi proudem a napětím výroby při maximálním zdánlivém výkonu  $S_{A \max}$ .

U výroben, které dodávají do sítě jalový výkon (např. přebuzené synchronní generátory, pulzní měniče), přitom platí:

$$P > 0 \text{ a } Q > 0$$

$$0^\circ \leq \varphi_E \leq 90^\circ.$$

U výroben, které odebírají ze sítě jalový výkon (např. asynchronní generátory, podbuzené synchronní generátory, síti řízené střídače) platí:

$$P > 0 \text{ a } Q < 0$$

$$270^\circ \leq \varphi_E \leq 360^\circ \text{ } (-90^\circ \leq \varphi_E \leq 0^\circ).$$

Pokud pro cosinový člen, tj.  $\cos(\psi_{kV} - \varphi)$  vychází hodnota menší než 0,1, pak se zřetelem na nejistoty tohoto výpočtu odhaduje 0,1.

V mnoha případech je v praxi udán maximální připojitelný výkon  $S_{A \max}$ , pro který je pak zapotřebí určit zvýšení napětí v přípojném bodu. K tomu je používán následující vztah:

$$\Delta u_{AV} = \frac{S_{A \max} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi)}{S_{kV}}. \quad (25)$$

V propojených sítích, v sítích 110 kV a/nebo při provozu více rozptýlených výroben v síti je zapotřebí určovat zvýšení napětí s pomocí komplexního chodu sítě. Přitom musí být dodržena podmínka pro  $\Delta u$  v nejnejpříznivějším přípojném bodě.

Při posuzování připojitelnosti výroben se vychází z neutrálního účinku v předávacím místě do DS, pokud PDS vzhledem k místním podmínkám (balance jalové energie, napětí v síti) nestanoví jinak. V tomto případě je pak zapotřebí doložit podrobnějšími výpočty bilanci ztrát v síti bez zdroje a při jeho provozu [9].

## 8.2 Změny napětí při spínání

Změny napětí ve společném napájecím bodě, způsobené připojováním a odpojováním jednotlivých generátorů nebo zařízení, nevyvolávají nepřípustné zpětné vlivy, tj. pokud největší změna napětí pro výroby s předávacím místem v síti nn nepřekročí 3%.

$$\Delta u_{\max nn} \leq 3\% \quad (26)$$

Pro výroby s předávacím místem v síti vn platí

$$\Delta u_{\max nn} \leq 2\% \quad (27)$$

Toto platí, pokud spínání není častější než jednou za 1,5 minuty.

Při velmi malé četnosti spínání, např. jednou denně, může PDS připustit větší změny napětí, pokud to dovolí poměry v síti.

Při spínání zdrojů v sítích vn a nn současně nesmí být překročeny limity napětí  $\pm 10\%$   $U_n$  v předávacím místě zdroje. Úroveň napětí musí být posouzena s ohledem na výši skutečné hodnoty napětí v předávacím místě.

Pro výroby v síti 110 kV platí pro omezení změny napětí vyvolané spínáním:

- a) Normální provoz:  
Spínání jedné výrobní jednotky
- $$\Delta u_{\max} \leq 0,5 \% \quad (28)$$

Spínání celého zařízení

$$\Delta u_{\max} \leq 2 \% \quad (29)$$

- b) Poruchový provoz  
Pro změnu napětí při spínání celého zařízení platí
- $$\Delta u_{\max} \leq 5 \% \quad (30)$$

V závislosti na zkratovém výkonu  $S_{KV}$  v síti PDS a jmenovitém zdánlivém výkonu  $S_{nE}$  jednotlivé výroby lze odhadnout změnu napětí

$$\Delta u_{\max} = k_{i\max} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{KV}} \quad (31)$$

Činitel  $k_{i\max}$  se označuje jako “největší spínací ráz” a udává poměr největšího proudu, který se vyskytuje v průběhu spínacího pochodu (např. zapínací ráz  $I_a$ ) ke jmenovitému proudu generátoru nebo zařízení, např.

$$k_{i\max} = \frac{I_a}{I_{nG}} \quad (32)$$

Výsledky na základě tohoto “největšího zapínacího rázu” jsou na bezpečné straně.

Pro činitel zapínacího rázu platí následující směrné hodnoty:

$k_{i\max} = 1$	synchronní generátory s jemnou synchronizací, střídače
$k_{i\max} = 4$	asynchronní generátory, připojované s 95 až 105% synchronních otáček, pokud nejsou k dispozici přesnější údaje o způsobu omezení proudu. S ohledem na krátkodobost přechodového jevu musí přitom být dodržena dále uvedená podmínka pro velmi krátké poklesy napětí
$k_{i\max} = I_a / I_{nG}$	asynchronní generátory motoricky rozbíhané ze sítě
$k_{i\max} = 8$	pokud není známo $I_a$ .

Asynchronní stroje připojované přibližně se synchronními otáčkami mohou vlivem svých vnitřních přechodných jevů způsobit velmi krátké poklesy napětí. Takovýto pokles smí dosáhnout dvojnásobku jinak přípustné hodnoty, tj. pro síť vn 4%, pro síť nn 6%, pokud netrvá déle než dvě periody a následující odchylka napětí od hodnoty před poklesem napětí nepřekročí jinak přípustnou hodnotu [9].

## 8.3 Připojování synchronních generátorů

U synchronních generátorů je nutné takové synchronizační zařízení, se kterým mohou být dodrženy následující podmínky pro synchronizaci:

- rozdíl napětí  $\Delta U < \pm 10\% U_n$
- rozdíl frekvence  $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$
- rozdíl fáze  $< \pm 10^\circ$ .

V závislosti na poměru impedance sítě k výkonu generátoru může být nutné k zabránění nepřípustných zpětných vlivů na síť stanovit pro spínání užší meze [9].

## 8.4 Připojování asynchronního generátoru

Asynchronní generátory rozbíhané pohonem musí být připojeny bez napětí při otáčkách v mezích 95% až 105% synchronních otáček. U asynchronních generátorů schopných ostrovního provozu, které nejsou připojovány bez napětí, je zapotřebí dodržet podmínky spínání jako pro synchronní generátory [9].

## ZÁVĚR

Vodní elektrárny mají své důležité zastoupení ve výrobě elektrické energie, nedosahují takových výkonů jako tepelné nebo jaderné elektrárny. Jejich výhoda je, že pro pohon vodní elektrárny je používána vodní energie, což je nevyčerpatelný zdroj energie, a je šetrná k životnímu prostředí. Tyto vlastnosti jsou v dnešní době důležité, kdy se neustále řeší, úspora energie a taky dopady na životní prostředí.

V České republice je hydroenergetický potenciál jenom 34,2%, což není mnoho, je to dáno tím, že zde nemáme mnoho obrovských řek, jako v jiných státech např. v Rusku nebo v Číně.

Vodní elektrárny vyrobily v roce 2013 3761,7 GWh, v roce 2012 2963 GWh,

a v roce 2011 2835 GWh. Instalovaný výkon u vodních elektráren byl pro rok 2013 2229,2 MW, pro rok 2012 2215,7 MW a pro rok 2011 2201,1 MW.

Kolik vodní elektrárny vyrobí elektrické energie závisí jaká je vydatnost vodního toku, to znamená, jestli v daném roce bylo sucho nebo záplavy. V České republice se vodní elektrárny podílí ve výrobě elektrické energie pro rok 2013 4,61%.

Dále se bakalářská práce zabývala vodními motory. Vodní kola se moc nevyužívají, je to dáno velkými rozměry vodního kola, malými provozními otáčkami a taky omezení provozu v zimní období, kdy dochází k zamrznutí vody. Proto se častěji využívají vodní turbíny. Nejvyšší účinnost má Kaplanova turbína. Největší výkon má Francisova turbína. Výhoda těchto turbín je taky natáčení lopatek.

Také jsem se zabýval problematikou provozování vodních elektráren, kdy mohou nastat zvláštní situace, jako například sucho nebo povodně. Tyto situace mohou způsobit komplikace, při výrobě elektrické energie.

Nakonec bych zmínil některé výhody a nevýhody vodních elektráren.

Výhody:

- patří do skupiny obnovitelných zdrojů,
- nevyžadují tolik obsluhy a údržby jako např. tepelné elektrárny,
- mohou zabránit k zaplavení oblastí,
- mají levný provoz,
- přehradní nádrže mohou sloužit také i k jiným účelům, např. zdroj vody pro průmysl, k rekreačním účelům, rybolov, atd. .

Nevýhody:

- drahá výstavba a také čas výstavby přehrady,
- je zde taky závislost na průtoku vody,
- zabraňuje migraci některým druhům ryb, např. úhoře říčního, proto je nutné vybudování rybovodu,
- je zde riziko havárie, např. protržení hráze, proto je nutné sledovat celkový technický stav vodního díla.



## SEZNAM ZDROJŮ

- [1] BROŽA, Vojtěch. *Využití vodní energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1990, 251 s.
- [2] *Schéma vodní elektrárny a její stručný popis* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.animfyzika.wz.cz/vodnielektrarna.swf>
- [3] *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2003. ISBN 80-889-0545-1.
- [4] *Vodná energia* [online]. Bratislava: Fakulta elektrotechniky a informatiky FEI STU, 2016 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.oze.stuba.sk/oze/vodna-energia/>
- [5] *Diagonální turbína* [online]. Blansko: ČKD Blansko, 1963 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.ckdblansko.cz/vyrobni-program/deriazova-turbina/tradice>
- [6] *Cavitation damage to a Francis turbine* [online]. Wikipedia, 2006 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation#/media/File:Turbine\\_Francis\\_Worn.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation#/media/File:Turbine_Francis_Worn.JPG)
- [7] *Diagonální turbína* [online]. Blansko: ČKD Blansko Holding, 2014 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.ckdblansko.cz/vyrobni-program/large-hydro-vodni-turbiny-a-hyrotechnicka-zarizeni/diagonalni-turbina>
- [8] *Vodná energia* [online]. Bratislava: Fakulta elektrotechniky a informatiky FEI STU, 2016 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.oze.stuba.sk/oze/vodna-energia/>
- [9] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ ZDROJŮ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY* [online]. Děčín: ČEZ distribuce, 2011 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: [http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011-priloha-4\\_def.pdf](http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011-priloha-4_def.pdf)
- [10] *Kaplanova turbína* [online]. Blansko: ČKD Blansko Holding, 2014 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.ckdblansko.cz/vyrobni-program/kaplanova-turbina>
- [11] *Peltonova turbína* [online]. Blansko: ČKD Blansko Holding, 2014 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.ckdblansko.cz/vyrobni-program/peltonova-turbina>
- [12] *Francisova turbína* [online]. Blansko: ČKD Blansko Holding, 2014 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.ckdblansko.cz/vyrobni-program/francisova-turbina>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1	Bilance koloběhu vody na Zemi (v 1000 km <sup>3</sup> ) [1]	11
Obr. č. 2	Schéma k výpočtu energetického ekvivalentu nádrže [1]	12
Obr. č. 3	Dělení vodních elektráren podle využívaného spádu (a - nízkotlaká, b - středotlaká, .....	16
Obr. č. 4	Schéma vodní elektrárny [2]	17
Obr. č. 5	Schéma vodních kol [1]	19
Obr. č. 6	Ponceletovo vodní kolo [1]	19
Obr. č. 7	Sagebienovo vodní kolo [1]	20
Obr. č. 8	Peltonová turbína [4]	22
Obr. č. 9	Bánkiho turbína od firmy Ossberger [3]	22
Obr. č. 10	Francisova turbína [4]	23
Obr. č. 11	Kaplanová turbína [4]	24
Obr. č. 12	Diagonální (Deriazova) turbína [5]	25
Obr. č. 13	Různé typy přímoproudových turbín [1]	25
Obr. č. 14	Reversibilní turbína HONE (a – turbínový provoz, b – čerpadlový provoz) [1]	26
Obr. č. 15	Francisova turbína poškozená kavitací [6]	26
Obr. č. 16	Schéma zapojení vodní elektrárny [1]	29
Obr. č. 17	Vztah polohy rotoru a statoru alternátoru a indukovaného proudu [1]	30
Obr. č. 18	Schéma zapojení synchronního generátoru na síť [3]	31
Obr. č. 19	Schéma zapojení asynchronního generátoru na síť [3]	33

## SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1	Orientační tabulka hodnot [1]	29
-----------	-------------------------------	----